

Composition corporelle et métabolisme énergétique

Pr Xavier Hébuterne

La composition corporelle

- **Grande utilité pour la détermination de l'état nutritionnel d'un patient**
- **Premières études autopsiques (19ème siècle) bases essentielles car mesure directe. Toutes les méthodes utilisées actuellement sont indirectes.**
- **Le corps humain est composé de nombreux éléments de densité différente (graisse, os, protéines, eau) dont les quantités respectives sont maintenues constantes.**
- **Compartiment : regroupement de certains éléments ayant une valeur physiologique voisine.**

Variations de la composition corporelle

- **Sexe**
- **Activité physique**
- **Age :**
 - **croissance de la MM jusqu'à 20 ans**
 - **Le pourcentage de graisse s'élève inexorablement d'environ 3,6% par an à partir de 20 ans chez la femme et de 2,4% par an chez l'homme à partir de 30 ans.**
- **Maladies, dénutrition**
- **Renutrition**

Le modèle à deux compartiments

- *Le modèle à deux compartiments* Il oppose la masse grasse et le reste, la masse non grasse (abusivement nommée masse maigre).
- **La masse grasse** correspond aux triglycérides stockés dans les adipocytes, quelle que soit leur localisation anatomique ; ce compartiment est virtuellement dépourvu d'eau.
- **La masse maigre** correspond à la somme de l'eau, des os, des organes, en excluant la partie grasse. La masse maigre est essentiellement constituée d'eau. Le rapport entre l'eau et la masse maigre définit l'hydratation de la masse maigre.
- **POIDS = MASSE GRASSE + MASSE MAIGRE**

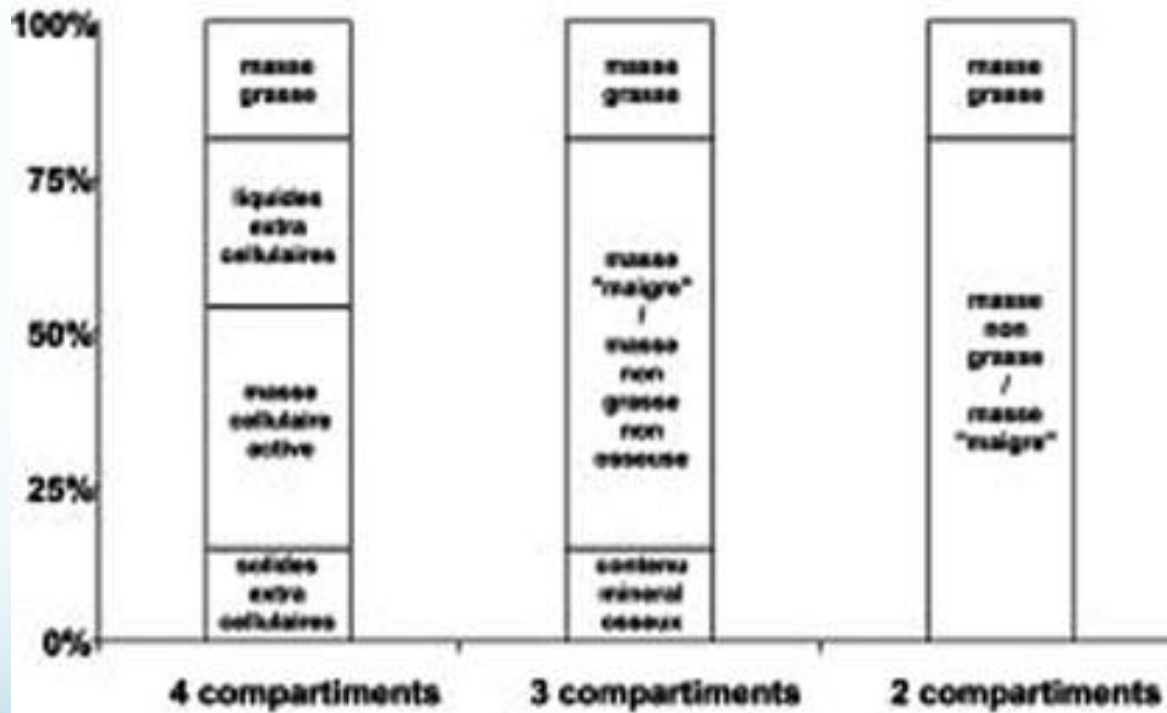
Le modèle à trois compartiments

- *Le modèle à trois compartiments* ; où la masse maigre est séparée en :
- **La masse cellulaire active** qui correspond à l'ensemble des cellules des différents organes et muscles. L'intensité du métabolisme de cette masse détermine les besoins énergétiques de l'organisme. Cette masse constitue l'essentiel des protéines de l'organisme,
- **L'eau extracellulaire** qui correspond à l'ensemble des liquides interstitiels et au plasma. Elle constitue la masse liquidienne facilement échangeable pour le fonctionnement normal de l'organisme. Elles s'ajoutent à l'eau intracellulaire pour constituer l'eau corporelle totale,
- **Le troisième compartiment est la masse grasse.**

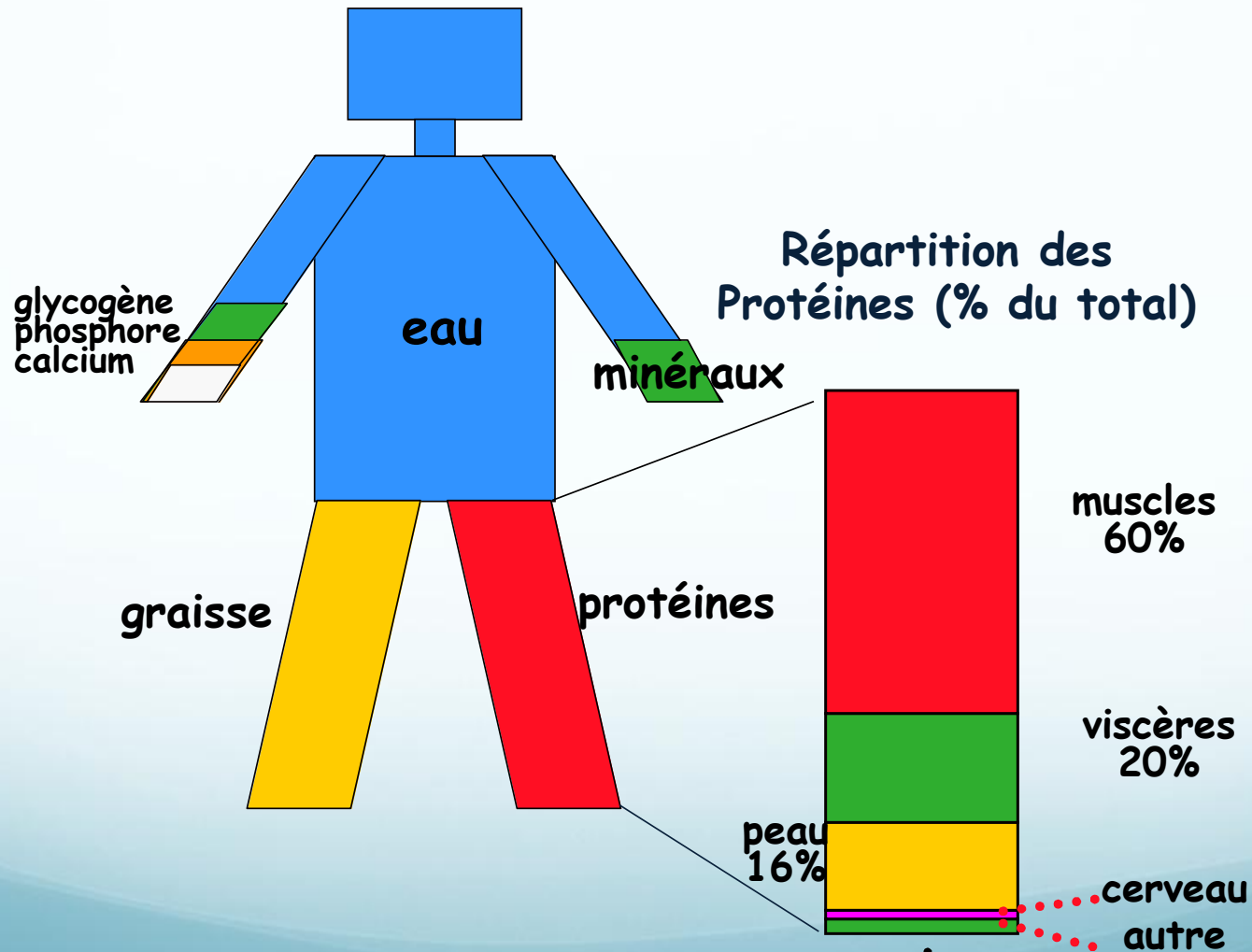
Le modèle à quatre compartiments

- *Le modèle à quatre compartiments* ; un compartiment supplémentaire est introduit dans la masse maigre, par rapport au modèle à trois compartiments :
- **La masse minérale osseuse** qui correspond aux cristaux de phosphates tricalciques du squelette. Cette masse constitue l'essentiel de la masse minérale de l'organisme, sous forme de calcium.

Les compartiments



Composition corporelle d'un sujet adulte (représentation schématique)



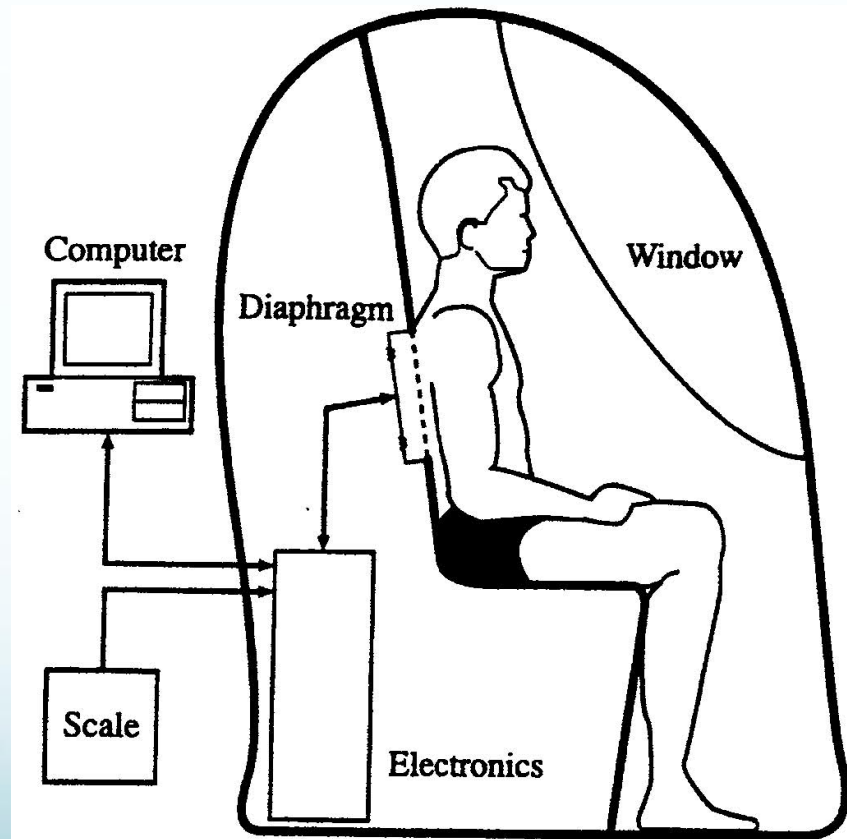
Mesure de la densité corporelle

- Dans le modèle à deux compartiments, si une densité fixe est attribuée à chaque compartiment (0,9 g par ml pour la masse grasse, et 1,1 g par ml pour la masse maigre), la proportion de chacun des compartiments peut-être calculée à partir de la densité du corps entier. Celle-ci est le rapport masse sur volume (D). L'équation de Siri permet de calculer le pourcentage de masse grasse :

$$\% \text{ MG} = 100 (4,95/D - 4,50)$$

- Cette méthode a longtemps été considérée comme la référence et a fourni une grande partie de nos connaissances de la composition corporelle. La densité corporelle peut être déterminée de deux façons :
- **Par hydrodensitométrie**, en utilisant le principe d'Archimède qui consiste à mesurer un volume en l'immergeant dans l'eau. Il faut donc un équipement adapté (une cuve de taille suffisante, une capacité à déterminer les volumes des gaz respiratoires et intestinaux).
- Cette technique ne peut être utilisée chez les enfants, les malades, les personnes âgées à mobilité réduite, les patients à coopération réduite,
- **Par pléthysmographie**, en utilisant la loi de Boyle-Mariote, où le produit pression * volume est une constante. Ainsi, si un corps est introduit dans une cabine de volume connu, le régime de pression de la cabine est modifié en proportion du volume introduit. Le volume corporel d'un individu peut-être mesuré en quelques minutes (environ 5) sans agression physique et avec un niveau de coopération limité. Cette méthode bénéficie d'un développement important.

Cabine pour la pléthysmographie



La méthode des quatre plis

- le pli bicipital : après mesure de la distance entre la pointe de l'olécrane et celle de l'acromion, la peau est pincée dans le sens de la longueur du biceps, à la mi-distance calculée, en regard de la face antérieure du bras,
- le pli tricipital : à mi-distance calculée, dans le sens de la longueur du triceps, en regard de la face postérieure du bras.
- le pli sous-scapulaire : à 2 travers de doigt sous la pointe de l'omoplate, le pli cutané est formé et orienté en haut et en dedans formant un angle d'environ 45° avec l'horizontale,
- le pli supra-iliaque : à mi-distance entre le rebord inférieur des côtes et le sommet de la crête iliaque, sur la ligne médioaxillaire, le pli est formé verticalement.

La méthode des quatre plis

- Les mesures sont réalisées par convention du côté dominant. Elles ne prennent que quelques minutes. L'épaisseur de quatre plis cutanés (bicipital, tricipital, sous-scapulaire et supra-iliaque) est déterminée.
- La somme des quatre plis cutanés est introduite dans des équations prédictives, en fonction de l'âge et du sexe, afin d'estimer la densité corporelle.
- L'hypothèse de la méthode est que l'épaisseur de la graisse sous-cutanée reflète la masse grasse totale de l'organisme. La détermination des plis doit être effectuée avec une pince spécialement calibrée (adiposomètre) permettant de mesurer l'épaisseur du pli sans écraser le tissu adipeux sous-cutané.
- La mesure doit être réalisée par un opérateur entraîné (coefficient de variation personnel inférieur à 5 %).
- Outre les problèmes liés à la mesure des plis cutanés (difficile voire impossible chez les sujets présentant une obésité sévère), cette méthode présente plusieurs limites liées à la localisation des plis sélectionnés et à leurs relations à la masse grasse totale. Les quatre plis décrits ci-dessus ne prennent pas en compte le tissu adipeux de la partie inférieure du corps et ont tendance à sous-estimer l'obésité gynoïde.

Equations prédictives de la densité corporelle (DC) en fonction de l'age et du sexe chez l'adulte

Tranches d'âge	Homme	Femme
17-19	DC = 1,1620 - 0,0630 (log S)	DC = 1,1549 - 0,0678 (log S)
20-29	DC = 1,1631 - 0,0632 (log S)	DC = 1,1599 - 0,0717 (log S)
30-39	DC = 1,1422 - 0,0544 (log S)	DC = 1,1423 - 0,0632 (log S)
40-49	DC = 1,1620 - 0,0700 (log S)	DC = 1,1333 - 0,0612 (log S)
>=50	DC = 1,1715 - 0,0779 (log S)	DC = 1,1339 - 0,0645 (log S)

S est la somme des 4 plis cutanés (bicipital, tricipital, souscapulaire et suprailiaque) exprimée en mm.

La mesure de l'eau totale

- Dans le modèle à deux compartiments, la masse grasse est dépourvue d'eau et la masse maigre en contient une proportion fixe (73 %). À partir de l'estimation de l'eau corporelle totale, il est donc facile de calculer la masse maigre:

$$\text{MM} = \text{EAU TOTALE} / 0,73$$

- Dans le modèle à trois ou quatre compartiments, l'eau corporelle totale et l'eau extracellulaire peuvent être considérées comme des compartiments (il s'agit alors d'une méthode de quantification). Les volumes d'eau (corporelle totale, extracellulaire, et intracellulaire) peuvent être déterminés de deux manières :

La mesure de l'eau totale

- **par dilution de traceur** : une dose connue de traceur est bue, des prélèvements de plasma, d'urine, ou de salive sont réalisés quatre à six heures après administration de la dose.
 - La concentration en traceur reflète le volume de dilution de la dose. Les traceurs de l'eau corporelle totale sont l'eau marquée au deutérium ou à l'oxygène 18, deux isotopes stables. L'eau tritiée n'est pas utilisée en France.
 - Le traceur de l'eau extracellulaire est le brome. Il n'y a pas de traceur de l'eau intracellulaire. Ces méthodes ne sont pas utilisées en routine car elles nécessitent un équipement lourd. Elles servent à étalonner d'autres méthodes.
- **par impédancemétrie** bioélectrique (méthode de prédiction)
 - L'impédancemétrie bioélectrique (bioelectrical impedance analysis, BIA) est basée sur la capacité des tissus hydratés à conduire l'énergie électrique.
 - L'impédance est fonction du volume du compartiment hydro-électrolytique contenu dans le corps.
 - L'impédance (Z) d'un corps est liée à la résistance spécifique (r), la longueur (L), et le volume conducteur (V) : $V = r L^2/Z$ (L est la taille de l'individu, r est une constante déterminée lors de l'étalonnage du système).

L'impédancemétrie bioélectrique

- La technique BIA la plus répandue utilise un seul courant de 800 μ Amp avec une fréquence de 50 kHz, et quatre électrodes de surface autocollantes. Deux électrodes sont placées au niveau du poignet, et deux le sont au niveau de la cheville homo-latérale. Le courant est appliqué pendant quelques secondes, et la mesure de Z est lue. Du fait des caractéristiques du courant, la mesure est totalement indolore. Quand le courant a une fréquence supérieure à 50 kHz, le volume mesuré est assimilé à l'eau corporelle totale.
- Quand cette fréquence est inférieure à 5 kHz, le volume correspond à l'eau extracellulaire. Des mesures avec plusieurs fréquences de courant permettent une approche des différents secteurs hydriques.
- Cette méthode fait l'objet de nombreuses critiques. À partir d'un modèle électrique simple, l'eau corporelle totale puis la masse maigre sont déterminées. La qualité de la validation initiale de l'équation, sa pertinence pour une population spécifique, les conditions de mesures (température, orthostatisme...) sont des facteurs qui influencent les résultats. Cependant, en pratique clinique, il s'agit d'une technique simple, facile à mettre en oeuvre, peu coûteuse et indolore pour le patient. Elle apporte des informations utiles dans des circonstances où les autres techniques ne peuvent être utilisées.

L'absorptiométrie biphotonique

- L'absorptiométrie biphotonique à rayons X (Dual x-ray absorptiometry, DEXA), initialement développée dans les années 80 pour la mesure du contenu minéral osseux, s'est imposée comme la méthode de référence pour l'étude de la composition corporelle.
- Elle consiste à balayer l'ensemble du corps avec un faisceau de rayons X à deux niveaux d'énergie. Le rapport des atténuations de ces deux rayonnements est fonction de la composition de la matière traversée.
- L'irradiation imposée au patient est faible et similaire à celle correspondant à une radiographie pulmonaire.
- La calibration est effectuée avec des fantômes artificiels contenant des triglycérides et du calcium.
- La DEXA permet de séparer trois compartiments (masse grasse, masse maigre et contenu minéral osseux) par un traitement informatique des mesures physiques. La précision est excellente.
- Par rapport aux méthodes précédentes, la DEXA mesure la valeur du compartiment osseux, négligé jusque là.
- Le balayage du corps entier et le traitement d'images permettent une approche régionale (bras, tronc, jambes) des trois compartiments mesurés, impossible à réaliser avec les autres méthodes.

L'absorptiométrie biphotonique

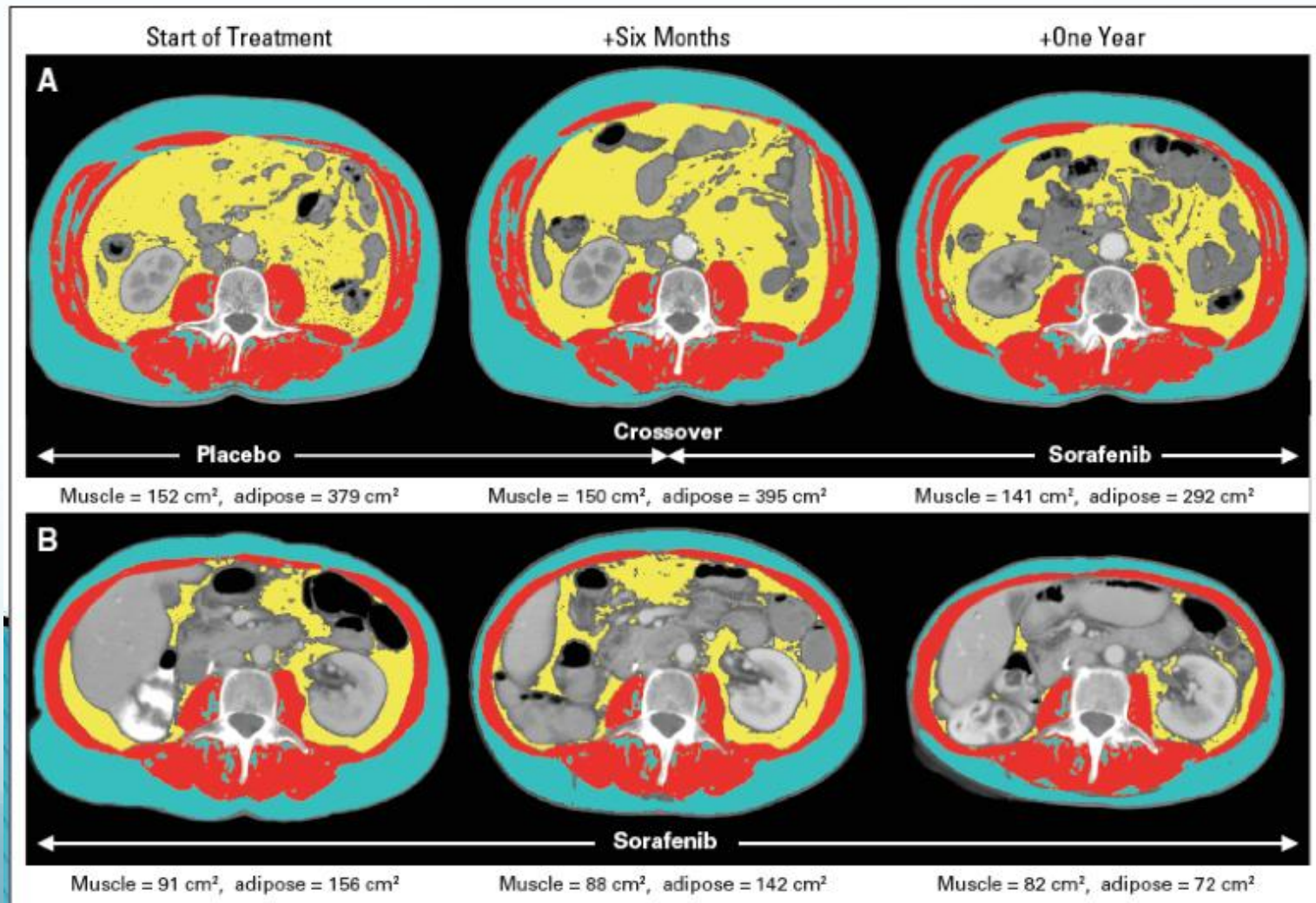
- La DEXA apparaît donc actuellement comme la méthode la plus intéressante pour l'étude de la composition corporelle et de ses variations en clinique.
- La limite réside dans le coût et la rareté des installations actuelles. Il faut souligner aussi que les appareils actuels ne sont pas adaptés aux sujets présentant une obésité massive, et aux patients qui ne peuvent se déplacer facilement (situation de réanimation...).



La tomодensitométrie computerisée

- La graisse péri-viscérale intra-abdominale intervient dans le déterminisme des complications métaboliques et cardio-vasculaires de l'obésité.
- En pratique clinique, nous avons pris l'habitude de mesurer la circonférence à la taille pour estimer l'adiposité abdominale.
- La tomодensitométrie permet de réaliser des coupes anatomiques abdominales et d'identifier dans un plan horizontal les tissus en fonction de leur densité qui atténue les rayons X.
- Elle ne fournit pas une mesure de la masse grasse viscérale (en kg) mais un calcul des surfaces des tissus adipeux profonds et superficiels.
- On peut ainsi décrire un rapport d'adiposité viscérale sur adiposité sous-cutanée.
- La méthode est rapide (quelques minutes si on se limite à une seule coupe) et la précision est bonne.
- De plus en plus utilisée en cancérologie

La tomodensitométrie computerisée



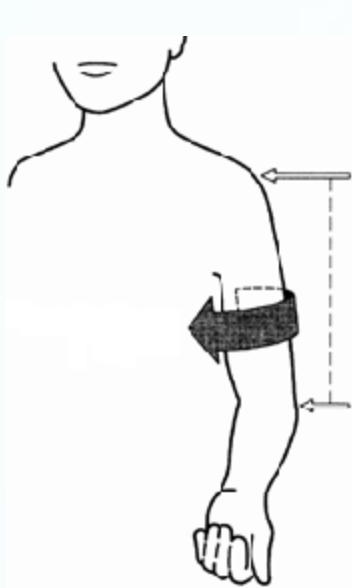
Mesures anthropométriques :

- **L'indice de masse corporelle**

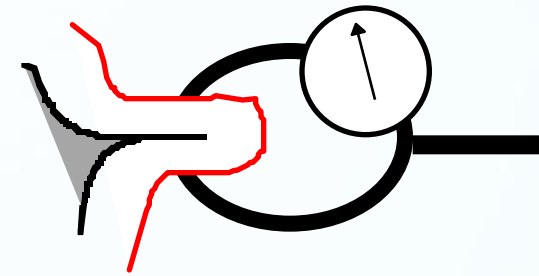
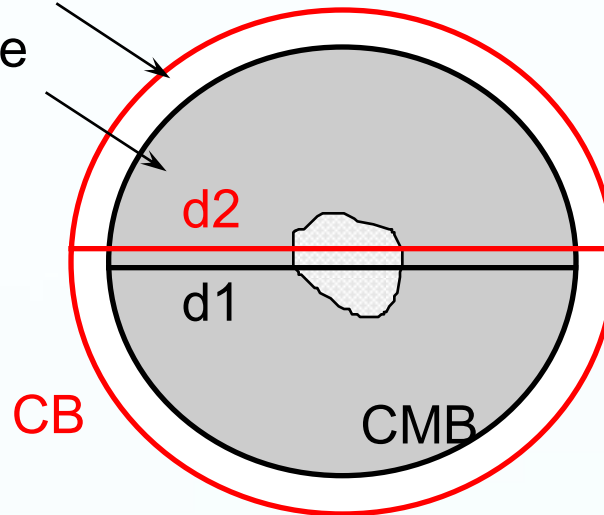
- L'indice de masse corporelle et le rapport : $IMC = \text{poids}/\text{taille}^2$, où le poids est en kg et la taille est en mètre. L'indice de masse corporelle est un outil précieux pour la définition des valeurs normales du poids (entre 18,5 et 24,9) et pour la définition du surpoids (entre 25 et 29,) et de l'obésité (au delà de 30). Les valeurs en dessous de 18,5 déterminent la dénutrition.

- **Estimation de la masse musculaire**

- Excrétion de la créatinine de la 3-méthylhistidine La créatinine est un métabolite de la créatine, dont le débit urinaire des 24 h reflète le pool total de créatine, situé à 98 % dans le muscle. La 3-méthylhistidine est un acide aminé présent dans les protéines myofibrillaires, qui n'est pas recyclé après protéolyse, et est excrété directement dans les urines. L'excrétion journalière est donc proportionnelle à la masse musculaire. Pour ces deux marqueurs, la mesure de l'excrétion s'effectue en état stable, c'est-à-dire après un régime de trois jours sans viandes ni poissons afin d'éviter les apports exogènes. Le temps de recueil des urines de 24 h doit être très précis. Le calcul de la masse musculaire est basé sur une équivalence de 17,9 kg à 20 kg de muscle par gramme de créatinine.
- La masse musculaire peut aussi être appréciée par *mesures anthropométriques* à partir de la circonférence musculaire brachiale, elle-même dérivée de la circonférence brachiale et du pli cutané tricipital. Bien que cette méthode soit peu précise, elle a un intérêt important en pratique médicale, car elle permet une appréciation de l'évolution de la masse musculaire au cours d'une situation clinique.



graisse
muscle



$$ECT = d2 - d1$$

Mesure de la circonférence
brachiale (CB) à mi-
distance entre
l'acromion et l'olécrane
sur le bras non dominant
demi-fléchi.

$$CMB = CB - 3,14 ECT$$

Valeurs de la CMB traduisant une dénutrition chez un
malade cirrhotique

Femme $CMB < 19$ cm

Homme de moins de 65 ans $CMB < 24$ cm

Homme de plus de 65 ans $CMB < 22$ cm

méthodes de mesure de la composition corporelle

Méthodes	Intérêts	Limites
Hydrodensitométrie	mesure simultanée masse grasse et masse non grasse	Modèle coopération des sujets coût appareillage
Eau Corporelle	mesure de volume	Modèle coût appareillage
Absorptiométrie Biphotonique (DEXA)	mesures simultanées masse grasse, masse maigre contenu minéral osseux pas de coopération	coût appareillage disponibilité corpulence
Tomodensitométrie	graisse viscérale/souscutanée	coût appareillage disponibilité qualitatif
Anthropométrie (plis cutanés)	coût rapidité répétition	modèle imprécision observateur obésité
Impédance bioélectrique (BIA)	coût rapidité observateur	modèle géométrie équations imprécision

Le métabolisme énergétique

- Principe de la thermodynamique : rien ne se perd, rien ne se crée tout se transforme : $\text{Aliments} + \text{O}_2 = \text{Energie} + \text{CO}_2 + \text{Déchets}$
- Pour calculer la dépense énergétique il faut calculer :
 - La consommation d'oxygène : VO_2
 - La production de gaz carbonique VCO_2
 - L'élimination urinaire d'Azote : N
- Si l'on admet que :
 - $\text{VO}_2 =$ consommation cellulaire d'oxygène
 - $\text{VCO}_2 =$ production cellulaire de gaz carbonique
- Valeur énergétique de l'oxygène = quantité d'énergie produite par l'utilisation d'un litre d'oxygène

Le métabolisme énergétique

- La dépense énergétique des 24 h se répartit en trois postes d'inégale importance :
 - le métabolisme de repos qui représente 60-75 % de la dépense énergétique totale,
 - la dépense énergétique liée à l'activité physique, dont la part varie en fonction de la nature, de la durée et de l'intensité de l'exercice
 - l'effet thermique des aliments (environ 10 % du total).
- La dépense énergétique des 24 h et le métabolisme de repos varient de façon proportionnelle au poids et à la masse maigre.
- Les macronutriments (glucides, lipides, protéines) qu'ils aient pour origine l'alimentation où les réserves endogènes constituent l'unique source énergétique pour l'homme. Pour être utilisable, cette énergie doit être transformée en ATP, processus qui consomme de l'oxygène et produit de la chaleur.
- La mesure de la consommation d'oxygène (calorimétrie indirecte) et/ou de la production de chaleur (calorimétrie directe) sont les deux méthodes de mesure de la dépense énergétique.

Le métabolisme énergétique

- Les grandes fonctions (croissance, développement, maintien, reproduction...) ont un coût énergétique dont la somme est appelée dépense énergétique totale.
- L'homme est incapable de fabriquer l'énergie. Pour couvrir ses besoins, il la puise dans le milieu extérieur ou dans ses réserves à partir des liaisons chimiques des nutriments et la transforme en une autre énergie chimique utilisable, l'ATP.
- L'homme est incapable de consommer l'énergie. Il la restitue au milieu extérieur de façon immédiate ou retardée, sous une forme identique et chimique (urée, créatinine par exemple) ou différente (mécanique et thermique).
- En l'absence de variation du poids ou de la composition corporelle, les apports énergétiques sont égaux aux dépenses.
- Les trois nutriments sources d'énergie sont les glucides, les lipides et les protéines. Ils contribuent à la couverture énergétique de façon hiérarchisée : les glucides, les protéines puis les lipides.
- Leur compartiment de réserves énergétiques a une capacité nulle pour les protéines, limitée pour les glucides (300 à 600 g) et immense pour les lipides.

Le métabolisme de base et la dépense énergétique de repos

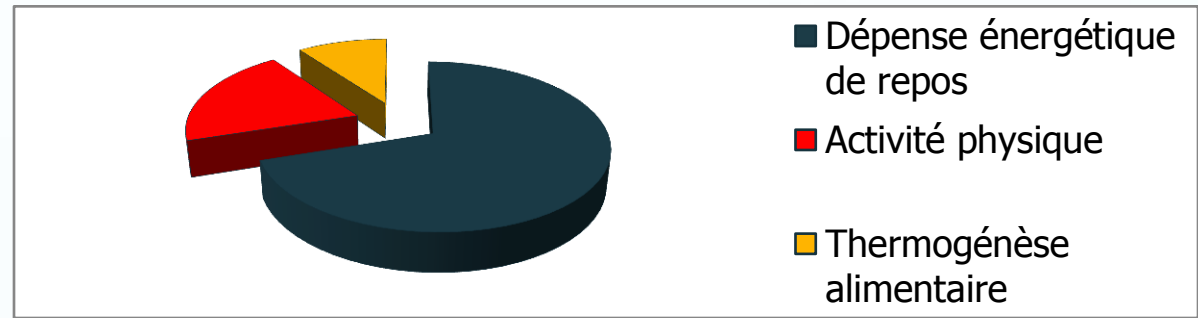
- Le métabolisme de base correspond à la dépense énergétique minimale pour le fonctionnement et l'entretien de l'organisme, dans des conditions très standardisées (à jeun, au repos, à température neutre).
- Le métabolisme de base est souvent confondu avec la dépense énergétique de repos.
- La dépense énergétique pendant le sommeil est inférieure d'environ 5 % par rapport au métabolisme de repos.
- Le métabolisme de base correspond à l'énergie nécessaire pour le fonctionnement des pompes ioniques, des turnover de substrats, des cycles futiles et pour le maintien de la température.
- Le métabolisme de base représente environ 60 % de la dépense énergétique des 24 h.

L'énergie dépensée pour l'activité physique

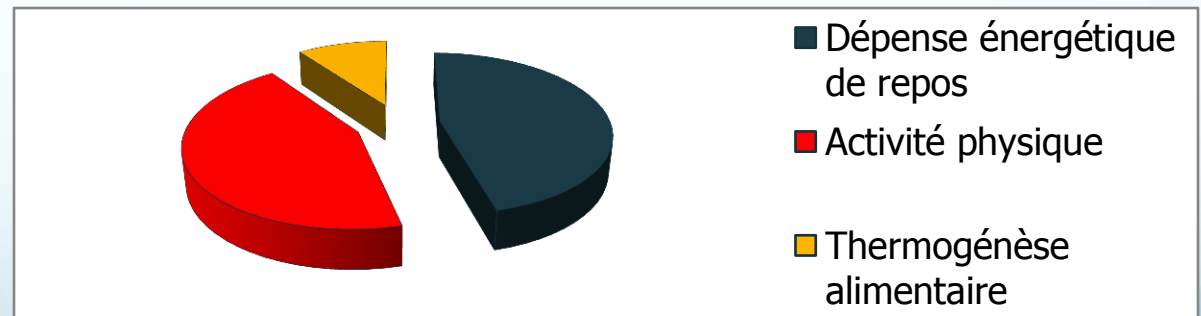
- Elle correspond à toute forme de dépense énergétique qui s'ajoute au métabolisme de base, à cause du mouvement.
- Ceci concerne tout aussi bien les activités de la vie quotidienne que les exercices physiques plus intenses, qu'ils soient sportifs ou non.
- Ce poste de dépense énergétique est le plus variable d'un individu à l'autre, et représente entre 15 % et 30 % de la dépense énergétique totale.

Dépense énergétique moyenne d'un homme de 70 kg

Activité physique normale
2400 Kcal/j



Sport intensif
3400 Kcal/j



La dépense énergétique

AGE /SEXE	INACTIFS	ACTIVITE MODEREE	ACTIVITE IMPORTANTE	ACTIVITE TRES IMORTANTE
Femmes 20 à 40 ans	1900 Kcal/j	2200 Kcal/j	2400 Kcal/j	2600 Kcal/j
Femmes 40 à 60 ans	1800 Kcal/j	2000 Kcal/j	2300 Kcal/j	2400 Kcal/j
Hommes 20 à 40 ans	2400 Kcal/j	2700 Kcal/j	3000 Kcal/j	3400 Kcal/j
Hommes 40 à 60 ans	2250 Kcal/j	2500 Kcal/j	2900 Kcal/j	3400 Kcal/j

NB : Etape de montagne du tour de France 6.000 à 10.000 Kcal,
M Phelps en période d'entraînement intense 12.000 Kcal/j

Le repas type de M Phelps !

- **Breakfast :**

- Three fried-egg sandwiches loaded with cheese, lettuce, tomatoes, fried onions and mayonnaise (1,500 cal), two cups of coffee.
- One five-egg omelette (500 cal),
- one bowl of grits (200 cal),
- three slices of French toast topped with powdered sugar (400 cal)
- and three chocolate-chip pancakes (600 cal).

- **Lunch :**

- One pound of pasta (2,000 cal).
- Two large ham and cheese sandwiches with mayonnaise on white bread (700 cal),
- 1,000 calories of energy drinks.

- **Dinner :**

- One pound of pasta (2,000 cal),
- an entire pizza (1,200 cal)
- Energy drinks (1,000 cal).



L'effet thermique des aliments

- Afin que l'énergie chimique contenue dans les aliments puisse être convertie en énergie utilisable, les aliments doivent être digérés, c'est-à-dire transformés en substances plus simples, puis être stockés par exemple au niveau du foie et du muscle sous forme de glycogène, ou au niveau du tissu adipeux sous forme de triglycérides.
- L'ensemble de ces processus coûte de l'énergie. Ce coût varie avec les voies biochimiques empruntées. On estime que ce coût représente environ 5 % à 10 % de la valeur calorique ingérée sous forme de glucides, 20 % à 30 % pour les protéines, et moins de 5 % pour les lipides.
- Dans certaines conditions (administration importante de glucides), une partie de l'effet thermique des aliments peut être inhibée par les agents bêtabloqueurs, ce qui indique un rôle du système nerveux sympathique dans son contrôle. On appelle ceci la thermogénèse facultative.
- Quelles que soient les possibilités de modulation de l'effet thermique des aliments, celui-ci ne représente qu'une faible portion (environ 10 %) de la dépense énergétique totale.

Les dépenses inhabituelles

- La croissance.
- La grossesse
- L'allaitement
- La thermorégulation (frisson)
- Coût nécessaire aux phénomènes de réparation et de cicatrisation qui peut s'avérer très important par exemple dans le cas des brûlures étendues.
- L'ensemble des réactions de défense contre l'infection et les réactions inflammatoires créent une dépense énergétique qu'il faudra savoir prendre en compte pour un patient.
- **L'ensemble de ces dépenses énergétiques constitue la dépense énergétique totale.**

La calorimétrie directe

- Dans cette méthode, on considère qu'il y a égalité entre production de chaleur et dépense d'énergie de l'individu.
- La réalisation de la mesure nécessite une enceinte de taille réduite et hermétique ou une combinaison calorimétrique, ce qui limite la durée tolérable des mesures.
- Cela permet la quantification des différentes composantes de la perte de chaleur.
- Cette méthode est actuellement peu utilisée en raison de ces limitations et du nombre réduit d'institutions disposant de l'équipement nécessaire.

La calorimétrie indirecte

- Cette méthode repose sur l'équivalence entre l'énergie utilisée dans l'organisme et celle convertie à partir de l'oxydation des nutriments.
- Il est donc possible d'utiliser la consommation globale d'oxygène comme témoin de la dépense d'énergie.
- La mesure des échanges gazeux respiratoires (consommation d'oxygène, et production de gaz carbonique) peut être réalisée en chambres calorimétriques, dans des conditions où le sujet pourra reproduire ses activités quotidiennes.
- La mesure peut également être réalisée sous une cagoule ventilée. Cet appareil est plus léger et ne permet que des mesures limitées dans le temps, (métabolisme de base et effet thermique des aliments).
- Les échanges gazeux respiratoires sont couramment mesurés avec un embout buccal en physiologie du sport ; la dépense énergétique au cours d'un exercice peut être évaluée ainsi.

Calorimétrie indirecte



énergétique de base à l'aide d'équations

- Equations de Harris et Bénédic
 - *Hommes : $13,7516 \times Poids (Kg) + 500,33 \times Taille (m) - 6,755 \times Age (an) + 66,473$;*
 - *Femmes : $9,5634 \times Poids (Kg) + 184,96 \times Taille (m) - 4,6756 \times Age (an) + 655,0955$*
- Equation de Cunningham
 - $DER = 370 + 21,6 \times MM (kg)$